МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 629.4.018: 620.179.162 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341

Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог*

А. Н. Киреев[1], Я. К. Склифус[2], М. А. Киреева[3]**
[1,3] Луганский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, Украина
[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Validity and informativity enhancement of ultrasonic testing of cast parts of railway rolling stock***

A. N. Kireev [1], Y. K. Sklifus [2], M. A. Kireeva[3]**
[1,3] Lugansk National University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Ukraine
[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Структура литых деталей подвижного состава железных дорог (ПСЖД) по технологическим причинам часто имеет внутренние дефекты, которые существенно влияют на их прочность. Степень влияния зависит от множества факторов, включая форму и расположение дефектов в изделии. Форма дефекта оказывает наибольшее влияние при знакопеременных нагрузках. Это часто относиться к динамически нагруженным деталям экипажной части ПСЖД. Максимально снижает долговечность детали дефект, ориентированный перпендикулярно к направлению растягивающих нагрузок. Для выявления внутренних дефектов детали подвергаются ультразвуковому контролю классическим эхо-импульсным методом. Однако такие методики требуют повышения достоверности и информативности. Например, они не позволяют определить тип и ориентацию дефекта.

Материалы и методы. Рассмотрены особенности, преимущества и недостатки классического эхо-импульсного метода ультразвукового неразрушающего контроля, который основан на регистрации следующих эхо-сигналов:

- посланный;
- отраженный от противоположной поверхности (дна) объекта;
- отраженный от дефекта (при его наличии).

Время прихода импульсов пропорционально толщине детали. При наличии дефекта это время пропорционально расстоянию от поверхности ввода импульсов до дефекта. Этим методом можно определить наличие дефекта, однако нет возможности определить его тип.

Результаты исследования. Для определения формы дефекта предложен двухчастотный метод дефектометрии. Описана его сущность, алгоритм и реализуемые аналитические зависимости. При обнаружении в объекте контроля эхо-сигнала от дефекта измеряются амплитуды донных сигналов и амплитуды эхо-сигналов от дефекта на частотах ультразвуковой волны 2,5 МГц и 5,0 МГц. Рассчитывается

Introduction. Due to the process reasons, the structure of cast parts of the railway rolling stock (RRS) often has embedded flaws that affect drastically their strength. The degree of impact depends on many factors including the shape and location of defects in the product. The shape of the defect has the greatest effect under alternating loads. This often refers to dynamically loaded parts of the RRS underframe. The defect oriented perpendicularly to the direction of tensile loads reduces the component life to the maximum. To identify embedded flaws, the parts are subjected to ultrasonic testing by the classical pulse-echo technique. However, such methods require increased validity and informativity. For example, they do not provide the determination of the type and orientation of the defect.

Materials and Methods. Features, advantages and disadvantages of the classical pulse-echo technique of the ultrasonic non-destructive testing, which is based on the registration of the following echo signals, are considered:

- sent;
- reflected from the opposite surface (bottom) of the object;
- reflected from the defect (if any).

The pulse arrival time is proportional to the thickness of the part. If there is a defect, this time is proportional to the distance from the pulse input surface to the defect. This method can determine the presence of a defect, but it cannot determine its type.

Research Results. To determine the shape of a defect, a dual-frequency defectometry method is proposed. Its principle, algorithm and implemented analytical dependencies are described. When an echo signal from a defect is detected in the monitoring object, the amplitudes of the bottom signals and the amplitudes of the echo signals from the defect are measured at the ultrasonic wave frequencies of 2.5 MHz and 5.0 MHz. The defect shape factor is calculated from the



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР №5 от 04.02.2019 в Луганском национальном университете им. В. Даля.
**E-mail: lifter_23@mail.ru, keiser@i.ua, lifter_23@mail.ru
***The research is done within the frame of independent R&D no. 5 of 04.02.2019 in Lugansk National University named after V. Dahl.

коэффициент формы дефекта по аналитической зависимости и определяется тип дефекта. Он может быть объемный (поры, раковины, неметаллические включения) или плоскостной (трещины, ликвации и др.).
Обсуждение и заключения. В работе предложен двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип дефекта при ручном ультразвуковом контроле литых деталей ПСЖД. Для экспрессного автоматизированного использования предложенного метода разработан программный продукт NDTRT-07.04-L и описан алгоритм работы с ним. Применение данного метода позволяет повысить достоверность и информативность результатов контроля.

analytical dependence; and the type of defect is determined. It can be volume (pores, shells, non-metallic inclusions) or planar (cracks, segregations, etc.).
Discussion and Conclusions. A dual-frequency defectometry method to determine the type of defect under the manual ultrasonic testing of the RRS cast parts is proposed in the paper. For an express automated use of the proposed method, the software product NDTRT-07.04-L is developed, and its operation algorithm is described. The application of the technique can increase the validity and informativity of the test results.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, дефектометрия, форма дефекта, двухчастотный метод, программный продукт, достоверность, информативность.

Keywords: ultrasonic testing, defectometry, defect form, dual-frequency method, software product, validity, informativity.

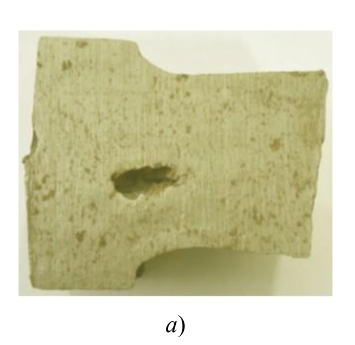
Образец для цитирования: Повышение достоверности и информативности ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог А. Н. Киреев [и др.] Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 335−341. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341

For citation: A.N. Kireev, et al. Validity and informativity enhancement of ultrasonic testing of cast parts of railway rolling stock. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 335−341. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-335-341

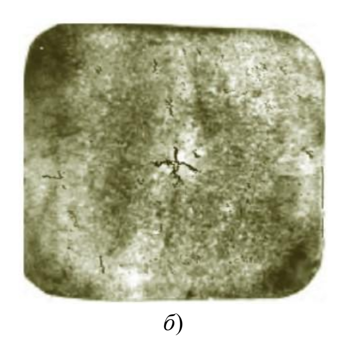
Введение. При помощи литейных технологий изготавливают многие ответственные детали экипажной части ПСЖД, например

- дисковые колесные центры тепловозов;
- спицевые колесные центры электровозов и электропоездов;
- боковины тележек грузовых вагонов;
- кронштейны тележек магистральных тепловозов.

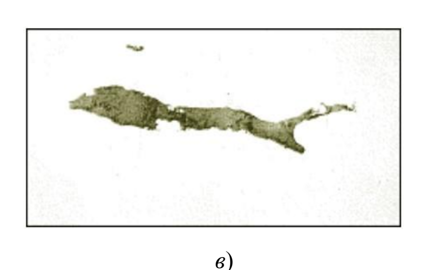
Структура литых деталей по технологическим причинам часто имеет дефекты. На рис. 1. представлены некоторые виды внутренних дефектов литья в деталях экипажной части ПСЖД.



а)



б)



в)

Рис. 1. Дефекты литья в деталях подвижного состава: а — сосредоточенная усадочная раковина в литом колесном центре; б — внутренняя осевая горячая трещина в заготовке оси колесной пары; в — оксидные неметаллические включения в литьевой колесной стали

Степень влияния внутренних дефектов на конструкционную прочность деталей зависит от ряда факторов, таких как:

- условия эксплуатации изделия;
- условия нагружения изделия;
- тип и расположение дефектов в изделии.

Внутренние дефекты в литых деталях ПСЖД могут иметь характер как объемный (поры, раковины, неметаллические включения) (рис. 1, *а*, *в*), так и плоскостной (трещины, ликвации и др.) (рис. 1, *б*). Объемные дефекты уменьшают площадь поперечного сечения детали, за счет чего снижаются ее прочностные свойства. Плоскостные дефекты, нарушающие сплошность металла, концентрируют напряжения на краях и также существенно снижают прочность. Причем, чем более плоскую форму имеет дефект, тем значительнее его влияние. В

этом случае снижение прочности может быть значительно больше, чем от объемных дефектов. Форма дефекта оказывает наибольшее влияние при знакопеременных нагрузках, что зачастую относиться к динамически нагруженным деталям экипажной части ПСЖД.

Максимально снижает долговечность детали дефект, ориентированный перпендикулярно к растягивающим нагрузкам. Худшим случаем является расположение дефекта в максимально нагруженном участке детали. Если направление плоскостного дефекта близко или совпадает с направлением растягивающих усилий, то прочность детали практически не снижается.

Для выявления внутренних дефектов ответственные литые детали ПСЖД при выпуске их из производства подвергаются ультразвуковому эхо-импульсному контролю. Однако классические методики, основанные на сравнении рабочего значения амплитуды эхо-сигнала с эталонным значением этого параметра, позволяют определить допустим ли дефект или нет, но не позволяют определить тип и ориентацию дефекта в детали. Следовательно, требуется повышение достоверности и информативности такого контроля.

Материалы и методы. Эхо-импульсный метод [1–7] ультразвукового неразрушающего контроля основан на регистрации эхо-сигналов от дефектов в объеме детали. При этом на экране ультразвукового дефектоскопа наблюдают посланный (зондирующий) импульс *I* и импульс *III*, отраженный от противоположной поверхности (дна) изделия (донный сигнал). При наличии в теле изделия дефекта наблюдается отраженный от него импульс *II* (эхо-сигнал от дефекта) (рис. 2.). Время прихода импульсов *III* и *II* пропорционально толщине детали и расстоянию от поверхности ввода ультразвуковой волны до дефекта. Если схема контроля является совмещенной (рис. 2), работу излучателя и приемника осуществляет единый преобразователь. Если схема раздельная, применяют два разных преобразователя.

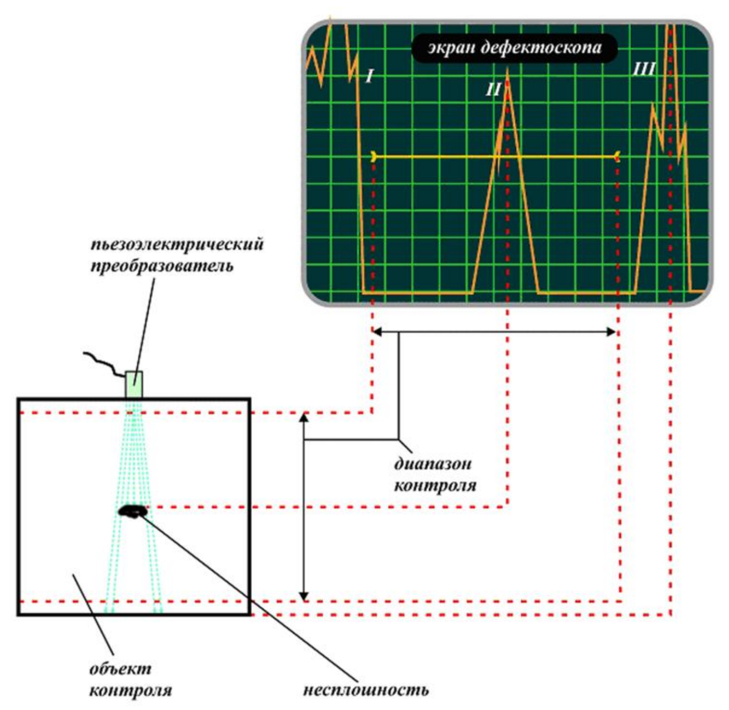


Рис. 2. Схема ультразвукового контроля эхо-импульсным методом

Допустимость несплошностей оценивают путем сравнения амплитуды эхо-сигнала от дефекта с амплитудой эхо-сигнала от эталонного отражателя в стандартном образце предприятия (эквивалентная чувствительность), либо с опорным уровнем чувствительности, настроенном на стандартном образце (мере) СО-2 (рис. 3) [8] с добавлением коэффициента усиления (условная чувствительность) [9].



Рис. 3. Мера СО-2

Стандартный образец предприятия изготавливается из изделия, идентичного объекту контроля по материалу, акустическим свойствам и геометрии. В качестве эталонных отражателей применяют различные виды искусственных отражателей, имитирующих реальные дефекты. Наибольшее распространение при контроле деталей ПСЖД получил плоскодонный цилиндрический отражатель. Это эталонный отражатель в виде плоского дна цилиндрического отверстия, ориентированного перпендикулярно оси цилиндра.

Результаты исследования. Для определения формы дефекта при ручном ультразвуковом контроле литых деталей ПСЖД предложен двухчастотный метод дефектометрии [10–13]. Его сущность в состоит следующем:

1. При обнаружении в объекте контроля эхо-сигнала от дефекта измеряют следующие характеристики на частотах ультразвуковой волны 2,5 МГц и 5,0 МГц:

- амплитуда донных сигналов;
- амплитуда эхо-сигналов от дефекта;
- расстояние от поверхности ввода волны до отражающей поверхности дефекта.

2. Рассчитывают коэффициент формы дефекта по зависимости:

$$v = N_{\text{деф}2,5} - N_{\text{деф}5,0} + N_{\text{д}5,0} - N_{\text{д}2,5},$$

где $N_{\text{деф}2,5}$ — амплитуда эхо-сигнала от дефекта на частоте ультразвуковой волны 2,5 МГц, дБ; $N_{\text{деф}5,0}$ — амплитуда эхо-сигнала от дефекта на частоте ультразвуковой волны 5,0 МГц, дБ; $N_{\text{д}2,5}$ — амплитуда донного сигнала на частоте ультразвуковой волны 2,5 МГц, дБ; $N_{\text{д}5,0}$ — амплитуда донного сигнала на частоте ультразвуковой волны 5,0 МГц, дБ

3. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального плоскостного точечного дефекта по формуле:

$$v_{\text{пл.т.}} = 20\lg\left(\frac{\lambda_{5,0}^2 \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2.5}^2 \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right),$$

где $\lambda_{2,5}$, $\lambda_{5,0}$ — длина ультразвуковой волны, соответственно, на частоте 2,5 МГц, мм и 5,0 МГц, мм; $S_{a2,5}$, $S_{a5,0}$ — площадь пьезоэлектрического преобразователя, соответственно, на частоте 2,5 МГц, мм^2 и 5,0 МГц, мм^2; x — расстояние от поверхности ввода волны до отражающей поверхности дефекта, мм; $x_{\text{д}}$ — расстояние от поверхности ввода волны до донной поверхности, мм.

4. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального объемного точечного дефекта по формуле:

$$v_{\text{об.т.}} = 20\lg\left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right).$$

5. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального плоскостного протяженного дефекта по формуле:

$$v_{\text{пл.пр.}} = 20\lg\left(\frac{\sqrt{\lambda_{5,0}^3} \cdot S_{a2,5}}{\sqrt{\lambda_{2.5}^3} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right).$$

6. Рассчитывают граничное значение коэффициента формы идеального объемного протяженного дефекта по формуле:

$$v_{\text{об.пр.}} = 20\lg\left(\frac{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}} \cdot \left(\frac{\lambda_{2.5} \cdot S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} \cdot S_{a2,5}}\right)^{\frac{x}{x_{\text{д}}}}\right).$$

7. Определяют тип точечного дефекта:

а) дефект считается плоскостным, если выполняется условие:

$$\nu \le v_{\text{пл.т}} + 0,3\left|v_{\text{об.т}} - v_{\text{пл.т}}\right|;$$

б) дефект считается объемным, если выполняется условие:

$$\nu \ge v_{\text{об.т}} - 0,3\left|v_{\text{об.т}} - v_{\text{пл.т}}\right|.$$

Если не выполняются оба условия, точечный дефект не является плоскостным, однако и не является идеально объемным.

8. Определяется тип протяженного дефекта:

а) дефект считается плоскостным, если выполняется условие:

$$\nu \le v_{\text{пл.пр}} + 0{,}3\left|v_{\text{об.пр}} - v_{\text{пл.пр}}\right|;$$

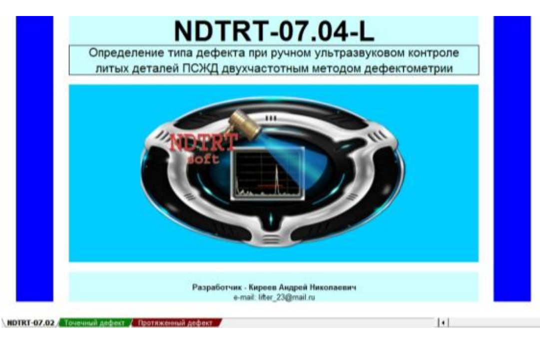
б) дефект считается объемным, если выполняется условие:

$$\nu \ge v_{\text{об.пр}} - 0{,}3\left|v_{\text{об.пр}} - v_{\text{пл.пр}}\right|.$$

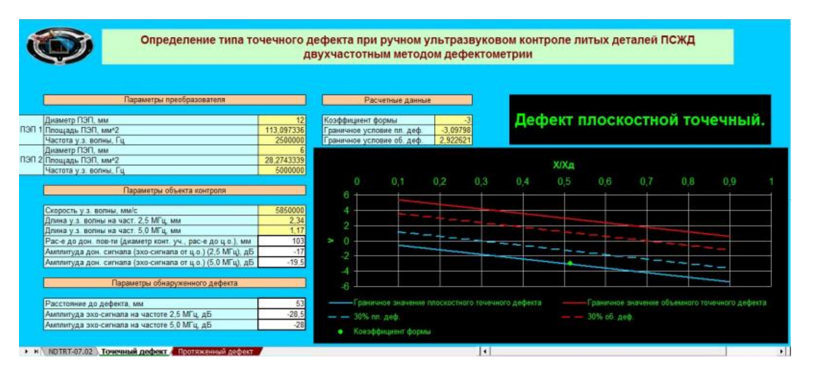
Если не выполняются оба условия, протяженный дефект не является плоскостным, однако и не является идеально объемным.

В методике определения типа как точечного, так и протяженного дефектов для расхождения между фактическими и граничными значениями коэффициента формы объемных и плоскостных несплошностей назначается доверительный интервал 30 %. Этот интервал получен эмпирически в результате проведения экспериментальных исследований, он учитывает методическую и инструментальную погрешности измерений.

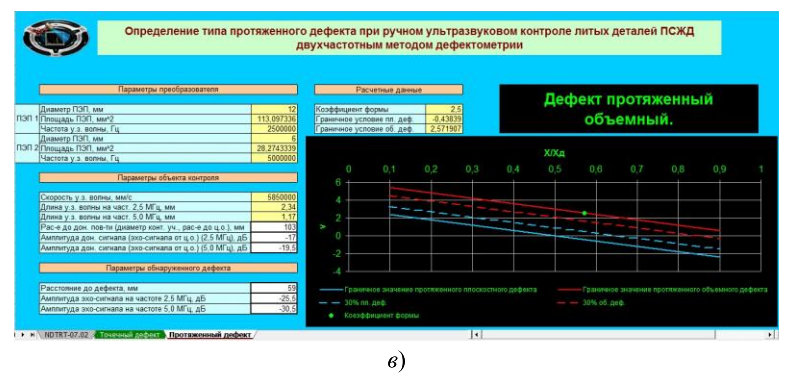
Для быстрого автоматизированного использования двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом контроле литых деталей ПСЖД разработан специальный программный продукт NDTRT-07.04-L. На рис. 4 изображены его рабочие окна.



а)



б)



в)

Рис. 4. Окна программного продукта NDTRT-07.04-L:
а — стартовое окно; *б* — окно «плоскостной дефект»; *в* — окно «объемный дефект»

Работа с программным продуктом NDTRT-07.04-L проводится следующим образом:

1. В соответствующем окне вводят следующие данные при частотах волны 2,5 МГц и 5,0 МГц:

- амплитуды донных сигналов;
- расстояние от поверхности ввода волны до дефекта;
- амплитуды эхо-сигналов от дефекта;
- расстояние до донной поверхности.

2. В соответствующем окне вводят тип дефекта и диаграмму зависимостей граничных условий и доверительного интервала от отношения расстояния до дефекта к расстоянию до донной поверхности.

Обсуждение и заключения. Посредством ручного ультразвукового контроля определяют допустимость внутренних дефектов литых деталей ПСЖД, однако нет возможности определить тип дефекта: объемный или плоскостной. В тоже время тип дефекта значительно влияет на конструкционную прочность изделия. Плоскостные дефекты более опасны, чем объемные, особенно в условиях динамических нагрузок при движении ПСЖД. Значит необходим иной подход к оценке допустимости разных типов дефектов.

Авторами предложен двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип дефекта при ручном ультразвуковом контроле литых деталей, а также повысить достоверность и информативность результатов контроля. Высокая достоверность двухчастотного метода дефектометрии подтвердилась результатами экспериментальных исследований [14].

Для экспрессного автоматизированного использования двухчастотного метода дефектометрии разработан программный продукт NDTRT-07.04-L.

Библиографический список

1. Алешин, Н. П. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый. — Москва : Машиностроение, 1989. — 456 с.

2. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов: Справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. — Москва : Металлургия, 1991. — 752 с.

3. Алешин, Н. П. Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев. — Минск : Высшая школа, 1987. — 264 с.

4. Гурвич, А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. — Киев : Техника, 1972. — 457 с.

5. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов. — Москва : Высшая школа, 1991. — 283 с.

6. Ермолов, И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. — Москва : Машиностроение, 1981. — 240 с.

7. Ермолов, И. Н. Физические основы эхо- и теневого метода ультразвуковой дефектоскопии / И. Н. Ермолов. — Москва : Машиностроение, 1970. — 108 с.

8. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые : ГОСТ Р 55724–2013. — Москва : Стандартинформ, 2014. — 24 с.

9. Киреев, А. Н. Анализ погрешностей применения условной чувствительности при ультразвуковом контроле деталей подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев, М. А. Киреева // Вестник Урал. гос. ун-та путей сообщения. — 2018. — № 2(38). — С. 27–34.

10. Киреев, А. Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев. — Луганск : Ноулидж, 2016. — 147 с.

11. Киреев, А. Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом / А. Н. Киреев // Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения. — 2015. — № 2(58). — С. 24–30.

12. Киреев, А. Н. Повышение информативности двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев // Вестник всерос. науч.-исссл. ин-та железнодорожного транспорта. — 2018. — Т. 77, № 3. — С. 182–187.

13. Киреев, А. Н. Визуализация изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев // Вестник всерос. науч.-исссл. ин-та железнодорожного транспорта. — 2017. — Т. 76, № 3. — С. 159–164.

14. Киреев, А. Н. Экспериментальные исследования метода дефектоскопии при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог / А. Н. Киреев // В мире неразрушающего контроля. — 2015. — Т. 18, № 4. — С. 72–75.

Сдана в редакцию 23.09.2019
Принята к публикации 28.11.2019

Об авторах:

Киреев Андрей Николаевич,
доцент кафедры «Железнодорожный транспорт» Луганского национального университета имени Владимира Даля, (Украина, 91000, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7548-3348,
lifter_23@mail.ru

Склифус Ярослав Константинович,
доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), (РФ,344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8471-4697,
yaroslav.sklifus@mail.ru

Киреева Маргарита Анатольевна,
ассистент кафедры «Железнодорожный транспорт» Луганского национального университета имени Владимира Даля, (Украина, 91000, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7463-2682,
lifter_23@mail.ru